

Совершенствование методов мониторинга качества работы дозировочных систем машин химизации

Андрей Борисович Калинин, Игорь Зиновьевич Теплинский, Виктор Александрович Смелик,
Ольга Николаевна Теплинская, Иван Сергеевич Немцев
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург-Пушкин, Россия
andrkalinin@yandex.ru

Аннотация. Снижение рисков химического загрязнения агроландшафтов при интенсивном применении удобрений в процессе их внесения мобильными технологическими машинами является актуальной задачей. Решение ее позволит обеспечить оптимальную техногенную нагрузку на сельскохозяйственную производственную среду. Поэтому на современном этапе проводятся работы по технико-экологическому переоснащению агротехнологий с целью широкого использования в них геоинформационных систем, позволяющих более рационально использовать минеральные и органические удобрения. Существующие методики оценки качества работы дозирующих систем машин химизации устанавливают лишь допуски на настройку. В условиях нормального функционирования под действием дестабилизирующих факторов внешнего и внутреннего характера качество работы дозирующих систем машин ухудшается во времени случайным образом. Это требует в процессе работы машины обеспечения оперативной корректировки настроечных параметров. Такая корректировка возможна с помощью средств автоматизированного активного контроля качества, которыми оснащают машины химизации. Разработка средств автоматизированного контроля требует совершенствования существующих оценок показателей качества работы дозирующих систем.

Ключевые слова: машина химизации; дозирующая система; расход удобрений; методы контроля качества; устройство активного контроля.

Для цитирования: Калинин А. Б., Теплинский И. З., Смелик В. А., Теплинская О. Н., Немцев И. С. Совершенствование методов мониторинга качества работы дозирующих систем машин химизации // Аграрный научный журнал, 2022. № 6. С. 94–98. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Improving the quality control methods for the functioning of dosing systems of chemicalization machines

Andrey B. Kalinin, Igor Z. Teplinsky, Victor A. Smelik, Olga N. Teplinskaya, Ivan S. Nemtsev
St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg-Pushkin, Russia;
andrkalinin@yandex.ru

Abstract. Reducing the risks of chemical pollution of agricultural landscapes with intensive use of fertilizers in the process of their application by mobile technological machines is an urgent task. Its solution will ensure the optimal technogenic load on the agricultural production environment. Therefore, at the present stage, work is being carried out on the technical and environmental re-equipment of agricultural technologies in order to widely use geoinformation systems in them, which allow more rational use of mineral and organic fertilizers. The existing methods for assessing the quality of the dosing systems of chemicalization machines only establish tolerances for tuning. Under conditions of normal operation, under the influence of destabilizing factors of an external and internal nature, the quality of the dosing systems of machines deteriorates randomly over time. This requires the provision of operational adjustment of the tuning parameters during the operation of the machine. Such an adjustment is possible due to using systems for automated active quality control on the chemicalization machines. The development of automated control systems requires the improvement of existing assessments of the quality indicators of the operation of dosing systems.

Keywords: chemicalization machine; dosing system; fertilizer consumption; quality control methods; active control device.

For citation: Kalinin A.B., Teplinskiy I.Z., Smelik V.A., Teplinskaya O.N., Nemtsev I.S. Improving the methods of monitoring the quality of functioning of dosing systems of mobile chemicalization machines // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(6):94–98. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp94-98>.

Введение. Снижение рисков химического загрязнения агроландшафтов при интенсивном применении удобрений в процессе их внесения мобильными технологическими машинами является актуальной задачей. Решение ее позволит обеспечить оптимальную техногенную нагрузку на сельскохозяйственную производственную среду, а также здоровье работников агросферы [1]. Поэтому на современном этапе проводятся работы по технико-экологическому переоснащению агротехнологий с целью широкого использования в них геоинформационных систем [2], позволяющих за счет мониторинга почвенного состояния более рационально использовать минеральные и органические удобрения. Такой подход существенно снижает деградацию задействованных в сельскохозяйственном производстве природных ресурсов. Однако, следует отметить, что если в области мониторинга и охраны атмосферного воздуха и природных вод достигнут определенный прогресс, то при контроле и охране почвенного покрова заметных достижений пока не наблюдается [3].





Важным направлением в решении задачи, связанной с минимизацией рисков химического загрязнения почв в системе «человек – машина – сельскохозяйственная производственная среда» является проведение онлайн экологического мониторинга условий и качества выполнения механизированных агрохимических работ. Использование результатов экологической диагностики при анализе состояния сельскохозяйственной производственной среды в процессе функционирования машин химизации позволит прогнозировать возможные нарушения установленных регламентов на протекание технологических процессов применения средств химизации. Одним из существенных факторов применения такого мониторинга является оснащение мобильных машин химизации автоматизированными устройствами активного контроля качества работы их дозирующих систем [4]. Работа таких устройств совместно с геоинформационными системами, используемыми в точном земледелии, позволит оперативно управлять ходом технологического процесса применяемых машин с учетом изменчивости внешних условий их эксплуатации [5]. Сложность учета составляющих вектора условий функционирования машин химизации заключается в том, что они представляют собой случайные в вероятностно-статистическом смысле процессы, протекание которых заметно влияет на выходные параметры, определяющие технологические свойства рассматриваемых объектов. Их случайный характер и определяет технологические свойства работы дозирующих систем машин химизации. Это в свою очередь требует совершенствования методологии оценки параметров контроля с учетом оперативности и точности функционирования разрабатываемых устройств.

Цель исследования – повышение технологической надежности и экологической безопасности функционирования машин для применения средств химизации за счет активного контроля качества.

Методика исследований. В настоящей работе приведены результаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами при изучении различных дозирующих систем, используемых в мобильных машинах для применения агрохимикатов. В основе этих исследований лежат разработанные профессором А.Б. Лурье принципы автоматического контроля и управления технологических процессов функционирования сельскохозяйственных агрегатов [6]. При выборе и обосновании параметров систем и оценке качества их работы использовались статистические методы анализа процессов.

Объектами исследования приняты наиболее распространенные в настоящее время конструкции дозирующих систем мобильных машин для применения твердых минеральных и органических удобрений [7]. Так для сплошного внесения агрохимикатов исследовались системы, выполненные на базе транспортерных дозаторов, а для локального – на базе катушечных и дисково-скребковых устройств. Анализ работы исследуемых машин химизации показал, что, несмотря на имеющиеся в них конструктивные и технологические отличия, модели функционирования их дозирующих систем как объектов активного контроля качества можно представить в виде обобщенной функциональной схемы, состоящей из четырех звеньев. Блок-схема ее приведена на рис. 1. Приводной механизм 1 преобразует управляющее входное воздействие в виде случайного процесса, характеризующего поступательную скорость агрегата $V(l)$ в частоту вращения приводного вала $n(l)$. В качестве аргумента случайной функции принят путь l . Возмущением $E(l)$ на это звено при синхронном приводе опорно-приводных колес машины будет их скольжение, а при несинхронном – буксование. С помощью звена 2, являющегося передаточным механизмом, параметр $n(l)$ преобразуется в скорость механизма $V_s(l)$, подающего рабочий материал непосредственно к дозатору 3. У транспортерных дозирующих систем это скорость перемещения транспортера-питателя, а у катушечных и дисковых устройств – частота вращения рабочих элементов. На выходе звена 3 имеем случайный процесс в виде дозированного расхода рабочего материала $q(l)$. Возмущениями, действующими на это звено, приняты уровень рабочего материала в бункере машины $H(l)$ и его объемная масса $\rho(l)$. Перемещаясь по полю, машина звеном 4 распределяет поступающий от дозатора рабочий материал по ширине захвата в виде расхода удобрений на единицу площади $Q(l)$. Настроенными параметрами являются воздействие U_1, U_2, U_3 , действующие соответственно на звенья 2, 3 и 4, и представляющие собой установочные значения передаточного механизма, собственно дозатора и распределительного звена, соответствующие заданной дозе расхода удобрений Q_H .

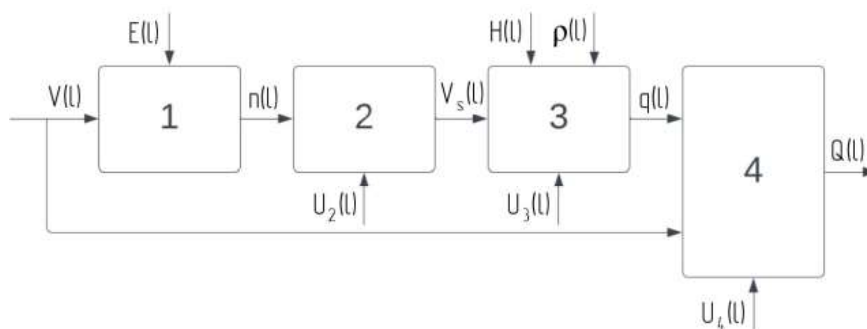


Рис. 1. Блок-схема обобщенной дозирующей системы машины химизации

Существующие методики оценки качества работы дозирующих систем машин химизации устанавливают лишь ограничения Δ_H на отклонения среднего значения m_Q процесса $Q(l)$ от заданного Q_H , т.е. допуск на настройку процесса. Поэтому для правильного функционирования системы необходимо выполнить следующее требование $Q_H - \Delta_H \leq m_Q \leq Q_H + \Delta_H$. В условиях нормального функционирования машины под дей-



ствием дестабилизирующих факторов внешнего и внутреннего характера качество работы ее дозирующей системы ухудшается во времени случайным образом. Это требует в процессе работы машины обеспечения оперативной корректировки настроечных параметров. Такая корректировка возможна с помощью средств автоматизированного активного контроля качества, которыми оснащается машина химизации. Разработка средств автоматизированного контроля требует совершенствования существующих оценок показателей качества работы дозирующих систем.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемые дозирующие системы машин химизации представляют собой нелинейные многомерные объекты, функционирование которых протекает в тяжелых условиях, вызывающих высокую зашумленность измерительных каналов, приводящую к низкому качеству работы. Здесь под качеством выполнения агрохимических работ будем понимать степень приспособленности системы дозирования к выполнению в заданных условиях критериев технологической (точностной) надежности и экологической безопасности функционирования машины. Причем за показатель технологической надежности P_{Δ} принята вероятность пребывания выходного параметра $Q(l)$ в поле двухстороннего симметричного допуска Δ_n , регламентируемого агропредписанием, т.е. $P_{\Delta} = P\{Q_n - \Delta_n \leq Q(l) \leq Q_n + \Delta_n\}$. Следует отметить, что на данном этапе в период формирования показателей экологического нормирования к работе машин химизации принято, что допустимая техногенная нагрузка на элементы агроландшафта будет выполнена при соблюдении агропредписаний [8]. Поэтому будем считать, что экологический критерий есть вероятность ε_{Δ} выхода процесса $Q(l)$ за пределы допуска Δ_n . Таким образом, при нормальном законе распределения процесса $Q(l)$, показатель ε_{Δ} будет определяться, как $\varepsilon_{\Delta} = 1 - P_{\Delta}$. Оценки показателей P_{Δ} и ε_{Δ} легко вычисляются, определив количество выходов ординат процесса $Q(l)$ за верхнюю n^+ и нижнюю n^- границы допуска из общего числа измерений N , т.е. $P_{\Delta} = 1 - (n^+ + n^-) / N$.

Исследования рассматриваемых дозирующих систем в условиях нормального функционирования показали, что критерий, характеризующий технологическую надежность, во всех случаях не превышает значения $P_{\Delta} = 0,4$ при допустимом уровне $[P_{\Delta}] = 0,7$ [4].

Как уже отмечалось, повышение качества дозирования удобрений машинами химизации возможно с использованием устройств активного контроля. При создании таких устройств важным этапом является выбор информативного параметра контроля, который поддается измерению. Таким параметром для дозирующей системы мобильных машин химизации принят расход рабочего материала на единицу пути $q_c(l)$, настроечное значение которого связано с параметрами Q_n выражением $q_n = \mu Q_n B$, где μ – масштабный коэффициент. Анализ процесса $q_c(l)$ показал, что следует отнести к случайным процессам нестационарным по математическому ожиданию и состоящим из аддитивной смеси средней функции $m_q(l)$ и высокочастотной центрированной составляющей $q'_c(l)$, т.е. $q_c(l) = m_q(l) + q'_c(l)$. При этом дисперсия этого процесса $D_q(l)$ постоянна и определяется выбором соответствующего интервала наблюдения, учитывающего выполнение условия, обеспечивающего репрезентативность получаемых данных [6].

Изменения условий функционирования машины химизации сказываются, в основном, на средних значениях реализации процесса $q_c(l)$, представляющих собой его информационную составляющую. Характер же случайных колебаний относительно средней функции объясняется наличием помех и ошибок измерений. В качестве примера на рис. 2 показаны отрезки реализации процесса $q_c(l)$ для машины химизации с дозирующей системой транспортерного типа, полученные при его синхронной регистрации измерителем и при раскладке удобрений по ходу движения в ячейки специального улавливателя. Характер кривой 1 показывает наличие высокочастотной составляющей в структуре процесса $q_c(l)$, полученного с помощью измерителя. Кривая 2 характеризует изменение средней функции $m_q(l)$ этого процесса, полученной в результате сглаживания ординат реализации случайного процесса $q_c(l)$. Кривая 3 на рисунке 2 характеризует отрезок реализации процесса расхода удобрений $q_c^y(l)$, распределенных по ходу движения машины в ячейки улавливателей. Полученный высокий коэффициент взаимной корреляции процессов $m_q(l)$ и $q_c^y(l)$, равный $0,62 \dots 0,86$, показал, что процесс $q_c(l)$ при активном контроле следует оценивать по его средней функции $m_q(l)$. Поэтому используемый массив данных при контроле, получаемый от измерителя, должен подвергаться сглаживанию. Для этого используется метод скользящего среднего [9], при котором сглаживание массива данных происходит заменой его первоначальных N значений средними величинами, вычисленными за интервал контроля L . Таким образом, первоначальный массив данных формируется за интервал контроля L из N измеренных с шагом Δl значений q_i процесса $q_c(l)$. Затем вычисляется среднее значение процесса $m_q^1(l)$. Далее интервал наблюдения обновляется по принципу вытеснения самого первого значения из массива данных N , сдвига второго значения на место первого и добавления к массиву данных следующего наблюдения q_i . При этом периоды определения среднего значения остаются постоянными. Это позволяет на каждом шаге измерения Δl иметь среднее значение m_q^i случайного процесса $q_c(l)$. Таким образом формируется случайный процесс $m_q(l)$, используемый для расчета оценок показателей технологической надежности дозирующей системы.

Выбор и обоснование рациональных параметров контроля Δl , L и N проводился с использованием имитационного моделирования. Для этого по результатам натурных исследований методом идентификации были получены математические модели рассматриваемых дозирующих систем в виде линейных уравнений регрессии $m_{q_{IV}} = a + bV$, связывающих выходную переменную $q_c(l)$ и входное воздействие $V(l)$. Рассматривая совокупности коэффициентов уравнения регрессии как реализации соответствующих случайных величин для них были рассчитаны средние значения m , среднеквадратические отклонения σ , коэффициенты вариации, а также определены границы 95-процентных доверительных интервалов. Результаты расчетов для исследуемых типов дозирующих систем машин химизации приведены в таблице [10].

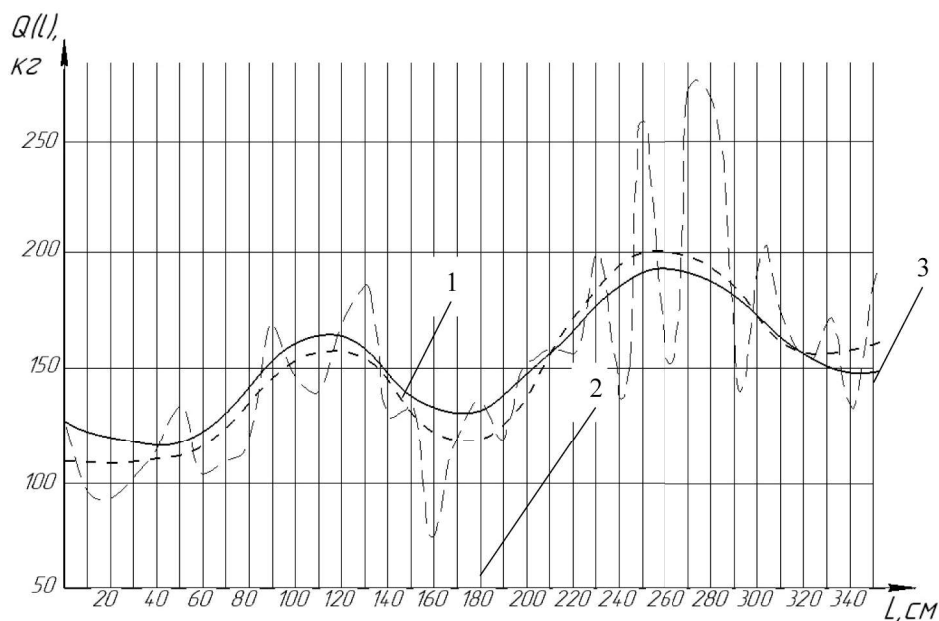


Рис. 2. Отрезки реализаций процесса расхода удобрений

По результатам имитационного моделирования установлено, что при скоростях движения машины до 10–12 км/ч следует принимать шаг измерений $\Delta l \approx 0,1 \dots 0,2$ м, количество измерений $N \approx 100 \dots 200$ и интервал контроля $L = 10 \dots 20$ м. При таких параметрах будет обеспечена статистическая репрезентативность используемых при активном контроле данных.

Оценки числовых характеристик коэффициентов уравнения регрессии моделей дозирующих систем машин химизации

Тип дозатора	Коэффициент взаимной корреляции	Коэффициенты уравнения регрессии	Статистические характеристики коэффициентов			Доверительные интервалы
			M	σ	$V, \%$	
Транспортерный	0.73	a	1,31	0,08	6,0	0,56–1,03
		b	10,48	2,11	20,1	4,23–16,72
Катушечный	0.64	a	2,73	0,69	25,3	0,66–4,81
		b	3,76	0,28	7,4	2,92–4,63
Дисково-скребковый	0.78	a	4,72	0,81	17,4	7,15–2,29
		b	1,56	0,17	11,2	1,05–2,07

Результаты исследований. Предложенная методика оценки качества функционирования дозирующей системы машины химизации использовалась в устройстве активного контроля, позволяющего в режиме онлайн вычислять показатель качества P_Δ и оперативно корректировать настройку машины с целью поддержания его на допустимом уровне. Блок-схема устройства активного контроля приведена на рис. 3. Она включает в себя дозирующую систему 1 машины химизации, распределитель удобрений 2, измеритель расхода 3 рабочего материала, бортовой компьютер 4, внешний накопитель информации 5, корректор 6 дозирующей системы и приемник 7 GPS-ГЛОНАС сигнала.

Перед началом работы в бортовой компьютер вводится информация о ширине захвата машины B , принятом допуске Δ_n на дозу внесения удобрений Q_n и допускаемый уровень показателя качества P_Δ . С внешнего накопителя в бортовой компьютер вносится задание на проведение агрохимических работ в виде электронной карты почвенного состояния поля, полученной офлайн по результатам агрохимического обследования. В соответствии с этой информацией, бортовой компьютер посредством корректора выполняет предварительную настройку дозирующей системы, соответствующую среднему значению дозы внесения удобрений для данного поля. При движении агрегата по полю GPS-ГЛОНАС приемник формирует управляющие сигналы о поступательной скорости движения объекта и его текущих координатах, а измеритель расхода рабочего материала – информацию о его фактическом поступлении в распределитель. На начальном интервале контроля L накапливается информация о процессе $q_c(l)$, производится оценка соответствия дозы внесения, указанной в карте-задании для данного участка поля, и вычисляется фактический показатель качества P_Δ , который сравнивается с допускаемым значением $[P_\Delta]$. При отклонениях фактического значения показателя качества корректор выполняет поднастройку дозирующей системы.



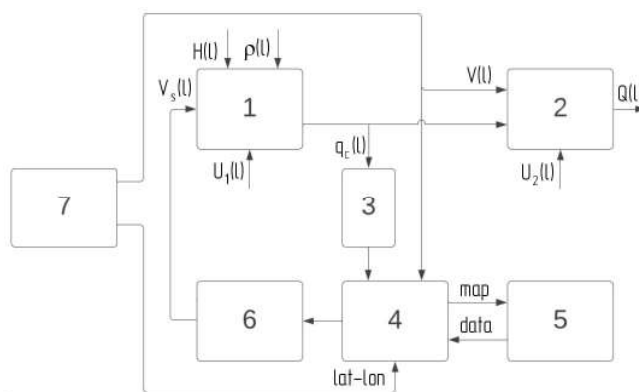


Рис. 3. Блок-схема устройства активного контроля машины для внесения удобрений

При пересечении агрегатом границы участка поля с другими настроечными параметрами дозы внесения удобрений происходит корректировка дозирующей системы машины, и процедура контроля качества выполнения технологического процесса повторяется.

Использование предлагаемой методологии контроля качества работы дозирующих систем машин химизации позволило увеличить их технологическую надежность, оцениваемую показателем P_{Δ} до 0,8.

Заключение. Применение предлагаемой методологии оценки качества работы дозирующих систем машин химизации, оборудованных устройствами активного контроля, совместно с использованием геоинформационных ресурсов позволяет снизить до 30% затраты на приобретение необходимых агрохимикатов за счет рационального применения минеральных и органических удобрений с учетом изменчивости внешних условий и мелкомасштабной неоднородности агроландшафтов по содержанию элементов питания. Это исключает риски химического загрязнения почв и формирует экологически безопасное антропогенное воздействие на сельскохозяйственную производственную среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Ю.Н., Пантюхин П.А., Шкрабак Р.В., Брагинцев Ю.Н., Шкрабак В.С. Теория и практика охраны труда в АПК. СПб., 2015. 744 с.
2. Федоренко В.Ф., Гольяпин В.Я., Колчина Л.М. Интеллектуальные системы в сельском хозяйстве. М., 2017. 156 с.
3. Современные проблемы науки и производства в агроинженерии. СПб., 2013. 496 с.
4. Теплинская О.Н. Оценка влияния антропогенных химических факторов на агроэкосистему при функционировании туковысевающих приспособлений комбинированных машин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. № 43. С. 351–354.
5. Калинин А.Б., Смелик В.А., Теплинский И.З., Первухина О.Н. Выбор и обоснование параметров экологического состояния агроэкосистемы для мониторинга технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 39. С. 315–319.
6. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. М.: Колос, 1981. 382 с.
7. Сельскохозяйственные машины. Практикум: учебное пособие / В.Е. Бердышев [и др.]. СПб., 2022. 316 с.
8. Кирюшин В.И. Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов. СПб., 2018. 567 с.
9. Валге А.М., Джаббаров Н.И., Эвиев В.А. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на STAGRAPHICS и EXEL. СПб.; Элиста, 2015. 140 с.
10. Теплинская О.Н. Идентификация технологического процесса функционирования туковысевающего приспособления как объекта контроля экологической безопасности применения удобрений // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. № 44. С. 294–299.

REFERENCES

1. Baranov Yu.N., Pantyukhin P.A., Shkrabak R.V., Braginets Yu.N., Shkrabak V.S. Theory and practice of labor protection in the agro-industrial complex. Saint Petersburg, 2015. 744 p.
2. Fedorenko V.F., Golyapin V.Ya., Kolchina L.M. Intelligent systems in agriculture. Moscow, 2017. 156 p.
3. Modern problems of science and production in agricultural engineering. Saint Petersburg, 2013. 496 p.
4. Teplinskaya O.N. Evaluation of the influence of anthropogenic chemical factors on the agro-ecosystem during the functioning of fertilizer-seeding devices of combined machines. *Izvestiya of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2016; 43: 351–354.
5. Kalinin A.B., Smelik V.A., Teplinskiy I.Z., Pervukhina O.N. Choice and substantiation of the parameters of the ecological state of the agroecosystem for monitoring the technological processes of cultivation of agricultural crops. *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2015; 39: 315–319.
6. Lurie A.B. Statistical dynamics of agricultural aggregates. Moscow, 1981. 382 p.
7. Agricultural machines. Workshop: study guide / V.E. Berdyshev et al. Saint Petersburg, 2022. 316 p.
8. Kiryushin V.I. Ecological bases for the design of agricultural landscapes. Saint Petersburg, 2018. 567 p.
9. Valge A.M., Dzhabbarov N.I., Eviev V.A. Fundamentals of statistical processing of experimental data when conducting research on the mechanization of agricultural production with examples on STAGRAPHICS and EXEL. Saint Petersburg; Elista, 2015. 140 p.
10. Teplinskaya O.N. Identification of the technological process of the functioning of a fertilizer-seeding device as an object of monitoring the environmental safety of fertilizer use. *Bulletin of the St. Petersburg State Agrarian University*. 2016; 44: 294–299.

Статья поступила в редакцию 18.01.2022; одобрена после рецензирования 18.02.2022; принята к публикации 02.03.2022.

The article was submitted 18.01.2022; approved after reviewing 18.02.2022; accepted for publication 02.03.2022.